Japanese Reference X
(Statement of Relevance)

This reference was cited during an opposition proceeding for a Japanese patent (JP 2995156 granted 11/22/99) issuing from an application corresponding to U.S. patent application Serial No. 07/475,111.

参考資料3

著者紹介

上坂吉則（うえさか よしのり）

1959年　名古屋工業大学電気工学科卒業
　　　　NHK放送科学基礎研究所を経て
1973年　金沢大学教授（工学部）
1979年　東京理科大学教授（理工学部）
　　　　現在に至る。工学博士
主要著書　「パターン認識と学習の理論」（文一総合出版，1971）
　　　　「情報数学の基礎」（培風館，1977）
　　　　「情報科学の基礎」（培風館，1979）

太原育夫（たはら いくお）

1974年　東京大学工学部電子工学科卒業
1979年　東京大学大学院工学系研究科博士課程修了
　　　　工学博士
　　　　東京理科大学助手（理工学部）
1981年　東京理科大学講師（理工学部）
　　　　現在に至る。

パソコンで学ぶ
パターン認識と図形処理

上坂吉則
太原育夫　著

検印
省略

1984年11月30日　第1刷発行
1985年12月20日　第2刷発行

発行所
株式会社　文一総合出版
代表者　奥村　武
〒162 東京都新宿区西五軒町34−8
電話　03−235−7341〜3
奥村印刷：製本

ISBN 4-8299-2068-8

パソコンで学ぶ

パターン認識と図形処理

上坂吉則
太原育夫　著

株式会社文一総合出版

11 パターン・マッチング——DPマッチング

テンプレートの変形をある程度許容しながら入力パターンとのマッチングを行なう方法を考える．ミスマッチの測度を計算する過程で動的計画法が用いられる．

説　　　明

パターン・マッチング（整合）は，あらかじめ用意されたテンプレート（参照パターン）を入力パターンに重ね合せ，それらが一致するかどうかによって入力パターンの識別を行なう最も基本的なパターン認識の手法である．しかし，原理は簡単であっても，マッチングの方法やマッチ（あるいは，ミスマッチ）の度合の評価にはいろいろなものが考えられる．

1では，入力パターンに対し，テンプレートをそのまま重ね合わせてマッチングを行なう最も簡単なマッチング法について述べた．この章では，テンプレートをある制限のもとで変形させながら入力パターンと重ね合わせ，最もよくマッチしたときのずれの量（パターン間の距離）をミスマッチの測度とするようなマッチング法を考える．

テンプレートをF，入力パターンをGとしてN次元の時系列パターンを考えることにする：

$$F:\ F(t)=(F_1(t),F_2(t),\cdots,F_N(t))\qquad(0\leqq t\leqq T_F),$$
$$G:\ G(t)=(G_1(t),G_2(t),\cdots,G_N(t))\qquad(0\leqq t\leqq T_G).$$

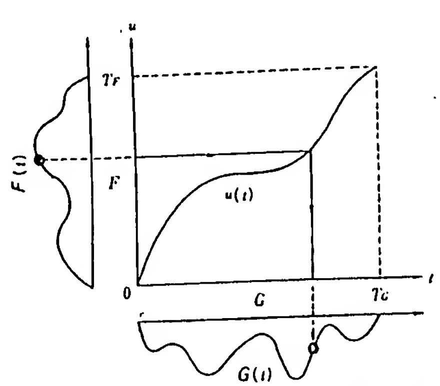


図 11.1　関数 $u(t)$ による時間軸の伸縮変換

時系列パターンの変形として最も一般的なものは，時間軸上の変動による変形，すなわち伸縮歪である．たとえば，音声パターンは時系列パターンの代表的なものであるが，人間が言葉を話す速度は一定ではないので，同じ人が同じ単語を発声してもその都度得られる音声パターンには時間軸上の伸縮歪が生じることになる．このようなパターンに対してマッチングを行なう場合には，時間軸上の伸縮歪を補正し，テンプレートと入力パターンが最も近似した状態になるようにしてから両者の間のずれを計量すべきであると考えられる．そこで，テンプレートFの時間軸を関数 $u(t)$ を用いて伸縮交換することにする．$u(t)$ は図11.1に示すような連続な単調増加関数で

$$u(0)=0,$$
$$u(T_G)=T_F$$

である．このように時間軸を変換したテンプレート $F(u(t))$ と入力パターン $G(t)$ の間の距離 $E(F,G,u(t))$ を

$$E(F,G,u(t))=\frac{\int\|G(t)-F(u(t))\|ds}{\int ds}\qquad(11.1)$$

と定義することにしよう．ここで

$$\|G(t)-F(u(t))\|=\sqrt{\sum_{n=1}^{N}(G_n(t)-F_n(u(t)))^2},$$
$$ds=\sqrt{1+\left(\frac{du}{dt}\right)^2}\,dt$$

であり，積分は $0\leqq t\leqq T_G$ について行なうものとする．この $E(F,G,u(t))$ を最小にするような $u(t)$ を選択すれば，FとGが最も近似した状態になるはずである．したがって，そのときの $E(F,G,u(t))$ の値をFとGのミスマッチの測度 $D(F,G)$ とすればよい．

$$D(F,G)=\min_{u(t)}[E(F,G,u(t))]\qquad(11.2)$$

さて，テンプレートF，入力パターンGがともに時間軸上で標本化された時系列パターンである場合について考えることにしよう：

$$F=f_1,f_2,\cdots,f_i,\cdots,f_I,$$
$$G=g_1,g_2,\cdots,g_j,\cdots,g_J.$$

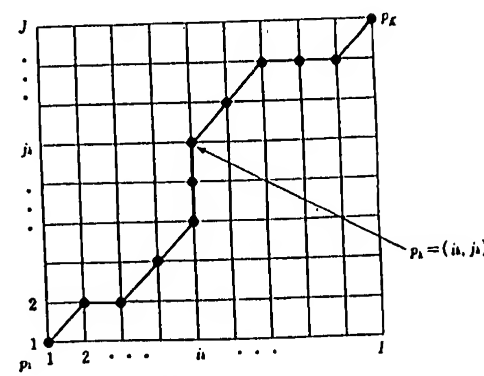


図 11.2　格子グラフ

この場合，時間軸の伸縮変換 $u(t)$ は，図11.2に示すような格子グラフ上の点（1, 1）から点（I, J）へ至るルートによって表現される．したがって，マッチングにおけるFの標本点とGの標本点の対応関係Pはこのルート上の点列で与えられることになる．格子点を

$$p_k=(i_k,j_k)\qquad(1\leqq i_k\leqq I,1\leqq j_k\leqq J)$$

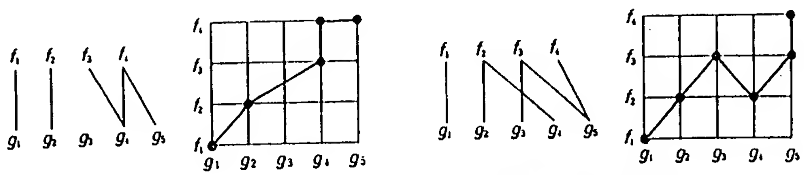
とすれば

$$P = p_1, p_2 \cdots, p_K$$

である．時間軸の伸縮変換が不自然なものにならないようにするため，ルートの選択には少なくともつぎのような制限が加えられる：

（1） 連続性と単調増加性，

（2） $p_1 = (1, 1)$ かつ $p_K = (I, J)$.



(a) 連続性に反する例　(b) 単調増加性に反する例

図 11.3　連続性と単調増加性に反する例

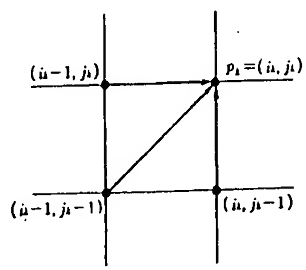


図 11.4　格子点 p_k に至るルート

したがって，図11.3に示すようなルートの選択は許されないことになる．条件(1)を満足するようなルートの選択方法はいくつか考えられるが，ここでは最も一般的なものとして，図11.4に示すようなルートの選択を考えることにする．すなわち，ルート上の格子点 $p_k = (i_k, j_k)$ に対して p_{k-1} は $(i_k-1, j_k), (i_k-1, j_k-1), (i_k, j_k-1)$ のいずれかでなければならない．このような制限を満足する対応関係 P について，F と G のミスマッチの測度 $D(F, G)$ は，(11.1) と (11.2) より積分を和に直して

$$D(F, G) = \min_P \left[\frac{\sum_{k=1}^{K} d(p_k)\Delta_k}{\sum_{k=1}^{K} \Delta_k} \right] \tag{11.3}$$

で与えられる．ここで

$$d(p_k) = \|g_{i_k} - f_{j_k}\|$$

であり，Δ_k は (11.1) の ds に対応している．

具体的に与えられた F と G について $D(F, G)$ の値を求める場合，(11.3) をまともにそのまま計算したのでは，最小値を得るのに相当な量の計算が必要となる．一般に，このような最小化問題は，動的計画法によって少ない計算量で効率よく解くことができる．Δ_k を

$$\Delta_k = (i_k - i_{k-1}) + (j_k - j_{k-1}),$$

ただし

$$i_0 = j_0 = 0$$

と定義すれば

$$\sum_{k=1}^{K} \Delta_k = I + J$$

であるから，(11.3) は

$$D(F, G) = \frac{1}{I+J} \min_P \left[\sum_{k=1}^{K} d(p_k)\Delta_k \right] \tag{11.4}$$

となり動的計画法が適用できる．

標本点間の対応関係 P に関して，つぎのような部分和を考える：

$$h(p_k) = \min_{p_1, p_2, \cdots, p_{k-1}} [d(p_1)\Delta_1 + d(p_2)\Delta_2 + \cdots + d(p_k)\Delta_k] \quad (k \leqq 2). \tag{11.5}$$

この部分和 (11.5) はただちに漸化式の形に変形でき

$$h(p_k) = \min_{p_{k-1}} [h(p_{k-1}) + d(p_k)\Delta_k] \tag{11.6}$$

となる．ここで $h(p_1) = d(p_1)\Delta_1 = 2d(p_1)$ である．ところで，格子グラフ上でのルートの選択には図11.4のような制限があるので，(11.6) は

$$h(p_k) = \min \begin{Bmatrix} h(i_k-1, j_k-1) + 2d(i_k, j_k) \\ h(i_k-1, j_k) + d(i_k, j_k) \\ h(i_k, j_k-1) + d(i_k, j_k) \end{Bmatrix} \tag{11.7}$$

となる．この漸化式により，$h(p_k)$ は $h(p_1)$ を初期条件として順次求まることになる．このようにして $h(p_K)$ が求まれば，ミスマッチの測度 $D(F, G)$ は

$$D(F, G) = \frac{1}{I+J} h(p_K) \tag{11.8}$$

となる．

以上のような方法によるパターン・マッチングは，ミスマッチの測度を計算する過程で動的計画法 (Dynamic Programming) が用いられるので，DP マッチングと一般に呼ばれている．

プログラム

テンプレート F，入力パターン G として1次元の時系列パターンが与えられたとき，DP マッチングにより，F と G のミスマッチの測度 $D(F, G)$ を求めるプログラムを考える．

一般に，DP マッチングを用いて入力パターンの認識を行なう場合には，単に $D(F, G)$ の値が求まりさえすればよく，そのときの対応関係 P は知る必要がないので，漸化式 (11.7) をそのまま計算するだけでよい．しかし，本章の目的は DP マッチングそのものを理解することにあるので，このプログラムでは，$D(F, G)$ を与える対応関係 P がどのようになっているのかということも表示することにする．対応関係 P を求めるには，配列 $P(i_k, j_k)$ $(1 \leqq i_k \leqq I, 1 \leqq j_k \leqq J)$ を用意しておき，漸化式 (11.7) の計算において最小値を与える格子点 p_{k-1} の p_k に対する相対位置をその都度記憶しておけばよい．すなわち，$h(p_k)$ を求めたとき最小値を与える p_{k-1} が

$$p_{k-1} = (i_k - 1, j_k - 1) \text{ ならば } P(i_k, j_k) = 1,$$

$$p_{k-1} = (i_k-1, j_k) \text{ ならば } P(i_k, j_k) = 2,$$
$$p_{k-1} = (i_k, j_k-1) \text{ ならば } P(i_k, j_k) = 3$$

としておけばよい．DP マッチングの終了後，$i_k = I, j_k = J$ を初期条件として，順次

$$\left.\begin{array}{lll} P(i_k, j_k) = 1 & \text{ならば} & i_{k-1} = i_k - 1, \quad j_{k-1} = j_k - 1 \\ P(i_k, j_k) = 2 & \text{ならば} & i_{k-1} = i_k - 1, \quad j_{k-1} = j_k \\ P(i_k, j_k) = 3 & \text{ならば} & i_{k-1} = i_k, \quad\quad j_{k-1} = j_k - 1 \end{array}\right\} \quad (11.9)$$

とすることにより，格子点 $p_k = (i_k, j_k)$ $(1 \leq k \leq K)$ を求めれば，$D(F, G)$ を与える対応関係 P が得られる．

プログラムの全体の流れはつぎのようになっている：

1° 表題の表示．

2° 初期設定．

3° テンプレートと入力パターンの指定．
指定されたデータ番号により，プログラム末尾にある時系列パターンのデータのなかから テンプレート F とするパターン，入力パターン G とするパターンを読込む．読込んだデータはただちにディスプレイ上に表示する．

4° DP マッチングの計算．
漸化式 (11.7) を用いてミスマッチの測度 $D(F, G)$ を計算する．また，$D(F, G)$ を与える対応関係 P を求めるため，この計算と平行して $h(p_k)$ を与える格子点 p_{k-1} の相対位置を配列 $P(i_k, j_k)$ に記憶しておく．

5° 対応関係の表示．
ミスマッチの測度 $D(F, G)$ を与える対応関係 P を (11.9) に従って求め，格子グラフ上のルートとして表示する．

6° 結果の表示．
テンプレート F，入力パターン G の時系列パターンの標本点が具体的にどのように対応付けられたのか表示し，かつ計算の結果得られたミスマッチの測度 $D(F, G)$ の値を表示する．

なお，このプログラムではグラフィック表示を用いるので，実行の際には付録Aのグラフィック・サブルーチンをアペンドしていただきたい．

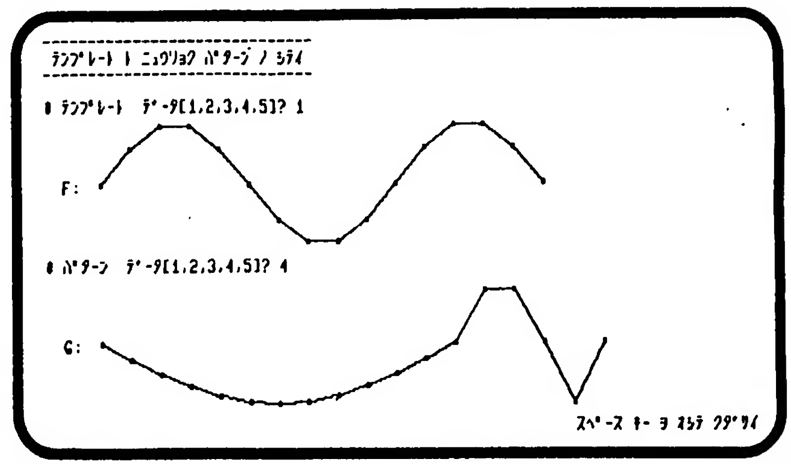
プログラムで用いている主な変数はつぎのとおりである：

F = 大きさ NF の1次元配列でテンプレート F 用の時系列パターン．
NF = テンプレート F の標本数．
G = 大きさ NG の1次元配列で入力パターン G 用の時系列パターン．
NG = 入力パターン G の標本数．
H = (11.5) で定義される $h(i_k, j_k)$ を表わす．
P = 対応関係 P を求めるための配列 $P(i_k, j_k)$ を表わす．

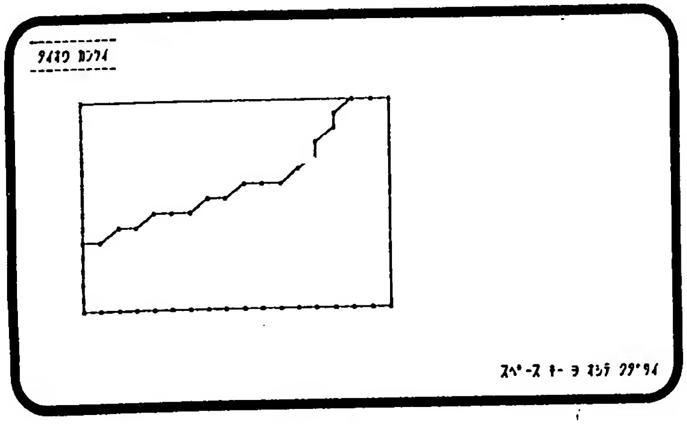
X7, X8, X9, Y7, Y8, Y9, X7%, X8%, Y7%, Y8% = グラフィック・サブルーチン用の入力変数（付録A参照）．

実　行　結　果

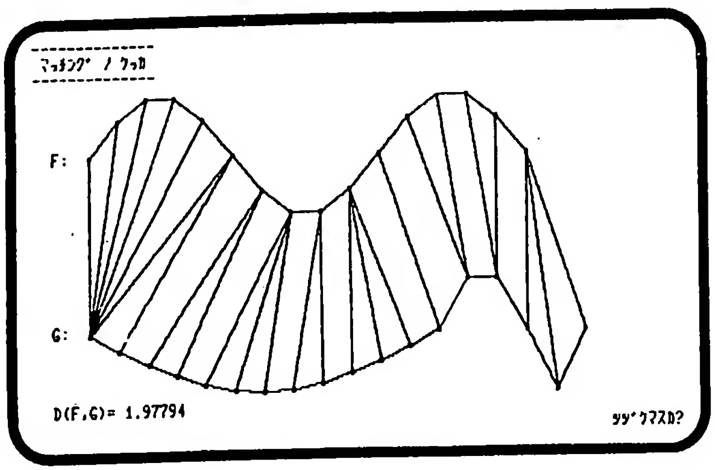
プログラムの実行例を以下に示す．プログラムを実行すると，まず表題が表示される．スペース・キーを押すと，プログラム末尾にある5つの時系列データのうちどれをテンプレート F とし，どれを入力パターン G とするか指定するよう要求してくる．ここでは，例としてデータ番号1の時系列データをテンプレートとし，データ番号4の時系列データを入力パターンとすることにする．データ番号を入力すると，それぞれのデータが読込まれ表示される．



指示に従いスペースキーを押すと，DP マッチングの計算が開始される．計算が終了し，F と G のミスマッチの測度 $D(F, G)$ の値とそれを与える標本点間の対応関係 P が求まると，まず対応関係 P が格子グラフによって表示される．ディスプレイ上の格子グラフにおいて，縦軸はテンプレート F の標本点，横軸は入力パターン G の標本点をそれぞれ表わしている．



スペース・キーを押すと，FとGの標本点が具体的にどのように対応付けられているのか表示される．そして，そのような対応関係における$D(F,G)$の値が表示される．$D(F,G)$はミスマッチの測度であるから，FとGが同一のパターンであればもちろん0となり，異なれば異なるほど大きな値となる．プログラムの末尾にある5つの時系列パターンのデータについて比較検討してみるとよい．



補　足

DPマッチングは，時間軸上の伸縮歪をもつ時系列パターン間のマッチングだけでなく，2次元平面上の図形パターンや画像間のマッチングにも適用することができる．その場合，主として2通りの適用のしかたが考えられる．

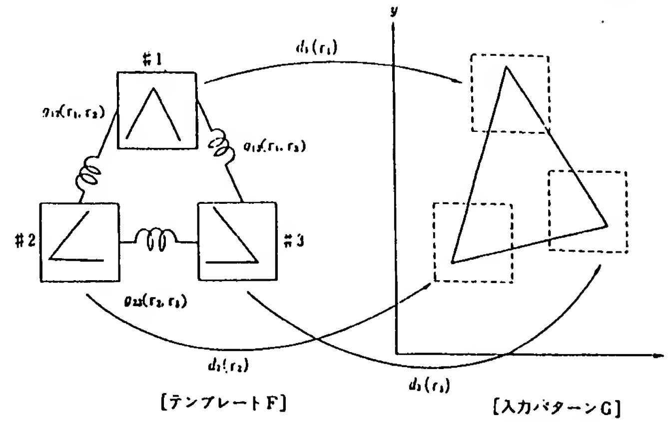


図 11.5　スプリング負荷モデルを用いたパターン・マッチング

1つの方法は，2次元平面上の線図形パターンをフリーマンのチェーン・コード（17参照）や全曲率関数（18参照）などを用いて1次元の記号列あるいは1変数の関数で表現する方法である．このような表現をすれば，2次元平面上のパターンも時系列パターンと同様な取扱いが可能になり，DPマッチングをそのまま適用することができる．

もう1つの方法は，テンプレートの変形のしかたを2次元に拡張する方法である．この場合，一般にテンプレートとしてはスプリング負荷モデルが用いられる．スプリング負荷モデルは，図11.5に示すように，いくつかの部分パターンをスプリングで結合した構造をしている．このようなテンプレートを用いてマッチングを行なう場合には，スプリング負荷モデルのスプリングを伸縮しながら入力パターンに重ね合わせ，最もよくマッチしたとき，すなわち各部分パターン自体がそれぞれよくマッチし，かつスプリングにかかる負荷が全体としてできるだけ少ないときのずれの量を求め，それをミスマッチの測度とすればよい．

いま，テンプレートFとしてN個の部分パターン（#1〜#N）からなるスプリング負荷モデルを考え，入力パターンGが定義されている2次元平面に重ね合わせるものとする(図11.5参照)．部分パターン #i の位置を $r_i=(x_i, y_i)$ としたとき，部分パターン自体のミスマッチの測度を $d_i(r_i)$ とする．また部分パターン #i が $r_i=(x_i, y_i)$ にあり，部分パターン #j が $r_j=(x_j, y_j)$ にあったとき，両者を結合しているスプリングにかかる負荷を $g_{ij}(r_i, r_j)$ とする．この $g_{ij}(r_i, r_j)$ としては，たとえば k_{ij}, l_{ij} を定数として

$$g_{ij}(r_i, r_j)=k_{ij}(|r_i-r_j|-l_{ij})$$

というような関数を考えればよい．さて，N個の部分パターンの配置を R_N としたとき，部分パターン #1から #i の配置を R_i で表現することにする：

$$R_i=\{r_1, r_2, \cdots, r_i\}. \tag{11.10}$$

このとき，配置 R_i に関する部分パターン #i のずれの量 $h_i(R_i)$ を